

Extreem-laagfrequente (ELF) en radiofrequente (RF) elektromagnetische velden (EMV), blootstelling van buschauffeurs in elektrische- en dieselmussen.

Remi de Groot
Institute for Risk Assessment Sciences
Universiteit Utrecht

Begeleider: Hans Kromhout



Samenvatting

Een aantal buschauffeurs van een vervoersbedrijf in het zuiden van Nederland ervaart gezondheidsklachten sinds de overgang in 2019 van diesel naar elektrische bussen. Sommige chauffeurs zijn van mening dat blootstelling aan elektromagnetische velden in de bus van de accu's, de WiFi en mobiel bellende passagiers hieraan ten grondslag liggen. De vakbond en het busbedrijf hebben daarom het Institute for Risk Assessment Sciences van de Universiteit van Utrecht gevraagd om dit te onderzoeken. Dit heeft geresulteerd in de volgende onderzoeksvraag:

Wat is de blootstelling aan Extreem-laagfrequente (ELF) en Radiofrequente (RF) Elektromagnetische velden (EMV) van buschauffeurs in rijdende elektrische bussen en niet-elektrische bussen?

Hiertoe is een persoonlijke blootstellingsstudie uitgevoerd. Over een periode van twee werkweken zijn chauffeurs vrijwillig uitgerust met dosimeters. Deze meters werden gedurende de gehele werkdag gedragen. Chauffeurs hielden bij wanneer zij van bus wisselden. Er kon onderscheid gemaakt worden tussen elektrische bussen voor korte of lange afstand en dieselmotoren. Gegevens als leeftijd en aantal werkjaren van de chauffeurs zijn ook meegenomen in het onderzoek. Er zijn verschillende typen dosimeters gebruikt om zowel de extreem laagfrequente als radiofrequente elektromagnetische velden in kaart te brengen. De ELF-EMV metingen zijn verricht met EMDEX Lite dosimeters en de RF-EMV metingen met de ExpoM-RF en de Radman 2XT dosimeters. Er is bij 78 chauffeurs de blootstelling gemeten op in totaal 144 werkdagen. De gemeten blootstellingen aan elektromagnetische velden zijn vergeleken tussen de drie gebruikte bus typen en afgezet tegen de meest recente richtlijnen zoals vastgesteld door de International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). De frequentiebanden in het RF-gebied zijn gegroepeerd op basis van toepassing van de verschillende frequenties. Dit resulteerde in zeven frequentiebanden. Deze zijn vergeleken met de laagste richtlijn per frequentieband.

Uit de metingen is gebleken dat de gemiddelde blootstelling aan ELF-EMV op een werkdag ($0,11 \mu\text{T}$) ruim binnen de ICNIRP-richtlijn ligt ($<0,001\%$). Wel is een 35% significant hogere blootstelling aan ELF-EMV gevonden bij chauffeurs van lange afstand elektrische bussen ten opzichte van de korte afstand elektrische- en dieselmotoren. Ook was de tijd $\geq 0,4 \mu\text{T}$ tot 15 keer langer in de lange afstandsbussen (gemiddeld 12 minuten per werkdag). Door roulatie van de chauffeurs over de verschillende bussen en routes zijn echter geen verschillen in gemiddelde blootstelling aan ELF-EMV tussen de chauffeurs gevonden.

Ook de gemeten blootstelling aan RF-EMV ($141 \mu\text{W}/\text{m}^2$) lag ruim binnen de ICNIRP-richtlijn ($0,72\%$). De RF-blootstelling bleek voor 82% afkomstig van mobiel telefoon- en dataverkeer, 10% van de boordradio en communicatie met de centrale en 8% van de Wi-Fi en overige bronnen. Langere verblijfstijden van de chauffeurs in elektrische bussen resulteerden in hogere blootstellingen aan RF-EMV van mobiel telefoon- en dataverkeer, communicatie en radio. Deze toename bedroeg 6-11% per extra uur in een elektrische bus. De gemiddelde blootstelling aan RF-EMV anders dan aan ELF-EMV, verschilde wel tussen de chauffeurs. Dit is waarschijnlijk het gevolg van verschillen in persoonlijk mobiel telefoongebruik.

In de huidige situatie uitgaande van de geldende ICNIRP-richtlijnen zijn geen schadelijke gezondheidseffecten (ten gevolge van opwarming van weefsel) te verwachten bij de buschauffeurs. Dit geldt voor zowel de blootstelling aan ELF-EMV in elektrische bussen als voor de blootstelling aan RF-EMV afkomstig van mobiel telefoongebruik, radiocommunicatie en de Wi-Fi.

Abstract

Several bus drivers of a transport company in the south of the Netherlands have experienced and reported health symptoms since the start of the transition from diesel to electric buses in 2019. Some drivers have attributed these symptoms to their exposure to electromagnetic fields in the bus from the batteries, the Wi-Fi-system and mobile phone use of passengers. The workers union and the bus company have therefore requested the Institute for Risk Assessment Sciences (IRAS) of Utrecht University to investigate the bus drivers' exposure to EMF. The following research question has been addressed:

What is the exposure to Extremely Low Frequency (ELF) and Radio Frequency (RF) Electromagnetic Fields (EMF) of bus drivers in moving electric buses and non-electric buses?

To answer the research question, a personal exposure measurement survey was carried out. Over a period of two working weeks, drivers were voluntarily equipped with dosimeters. These meters were worn throughout the entire workday. Drivers kept track of the bus types they drove, so a distinction could be made between electric buses for short or long distances and diesel-powered buses. Personal information as the bus drivers' age and years of service on the job were also included in the analyses of the exposure data. Different types of dosimeters have been used to assess exposure to both extremely low frequency and radio frequency electromagnetic fields. The ELF-EMF measurements were performed with the EMDEX Lite dosimeter and RF-EMF measurements were conducted with the ExpoM-RF and the Radman 2XT dosimeters. The exposure of 78 drivers was measured on 144 shifts. The measured electromagnetic field exposures were compared between the three bus types. Additionally, exposure levels were compared with occupational guidelines established by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). The RF frequency bands were grouped according to their application. This resulted in seven frequency bands. The exposure in these bands were compared against the lowest exposure guideline within each frequency band.

The measurements showed that the average shift exposure to ELF-EMF ($0.108 \mu\text{T}$) was below the ICNIRP guidelines ($<0.001\%$). Among drivers of long-distance electric buses however, a significant 35% higher ELF-EMF exposure was observed compared to exposure in short-distance electric and diesel buses. Also, time spent $\geq 0.4 \mu\text{T}$ was up to 15 times longer on the long-distance buses compared to other bus types (12 minutes per shift). However, due to the rotation of the drivers over the different buses and routes throughout the day, no differences in average exposure to ELF-EMF between the drivers were found.

The measured exposures to RF-EMF ($141 \mu\text{W}/\text{m}^2$) were also within ICNIRP guidelines (0,72%). The main contribution to the total RF exposure originated from the mobile network and data traffic 82%. Another 10% was related to on-board radio and communication with the control centre and 8% from the Wi-Fi system and other sources. Longer shifts on electric buses resulted in higher exposures to RF fields from mobile network and data traffic and from on-board radio and communication with the control centre. The increase was 6-11% per extra hour on an electric bus. In contrast with individual average exposure to ELF-EMF, the individual average exposure to RF-EMF varied significantly between drivers. Differences in personal cell phone usage will most likely be the underlying factor. In the current situation, based on the latest ICNIRP guidelines, no adverse health effects (from thermal effects) are to be expected among the bus drivers as a result of their exposure to ELF-EMF in the electric buses and their exposure to RF-EMF from mobile phone use, radio communication and Wi-Fi.

Trefwoorden

- Elektromagnetisch velden (EMV)
- Extreem-laagfrequente elektromagnetische velden (ELF-EMV)
- Radiofrequente elektromagnetische velden (RF-EMV)
- EMDEX Lite
- ExpoM-RF
- Radman 2XT
- Buschauffeur

Keywords

- Electromagnetic fields (EMF)
- Extreme Low Frequency Electro Magnetic Fields (ELF-EMF)
- Radio Frequency Electromagnetic Fields (RF-EMF)
- EMDEX Lite
- ExpoM-RF
- Radman 2XT
- Bus driver

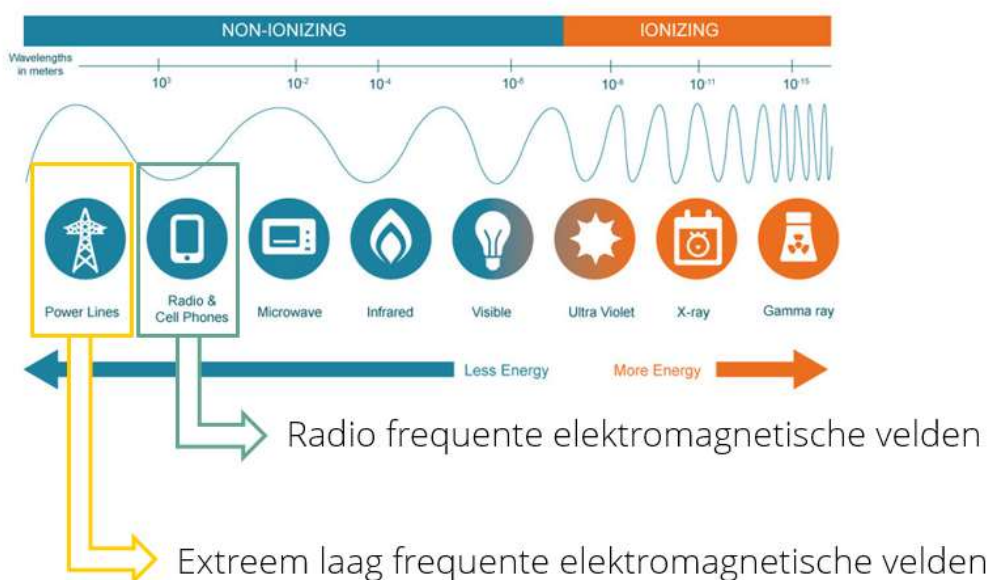
Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
Abstract	3
Trefwoorden.....	4
Keywords	4
Inhoudsopgave	5
Introductie	6
Materiaal en methode.....	8
ELF-EMV	8
RF-EMV	8
Dosimeter harnas.....	8
Statistische en andere software	8
Statistische analyse	9
Pilotstudie	10
Meetstrategie	11
Hoofdstudie.....	11
Vergelijking met blootstellingslimieten	12
Opschonen meetgegevens.....	12
Uitgewerkt voorbeeld werkdagmetingen.....	13
Resultaten	15
Extreem-laagfrequente elektromagnetische velden	15
Radiofrequente elektromagnetische velden	17
Discussie en conclusie.....	20
Sterke punten.....	21
Zwakke punten	21
Vergelijking literatuur.....	22
Bijlage	24
Referenties.....	25

Introductie

Een aantal buschauffeurs van een vervoersbedrijf in het zuiden van Nederland ervaart gezondheidsklachten sinds de overgang in 2019 van dieselbussen naar elektrische bussen. Sommige chauffeurs zijn van mening dat dit het gevolg kan zijn van blootstelling aan elektromagnetische velden in de bus. Een aantal van hen zit ziek thuis. De vakbond (FNV) heeft hierop het vervoersbedrijf gevraagd dit uit te zoeken. Het vervoersbedrijf heeft de kwestie neergelegd bij het Institute for Risk Assessment Sciences (IRAS) van de Universiteit van Utrecht.

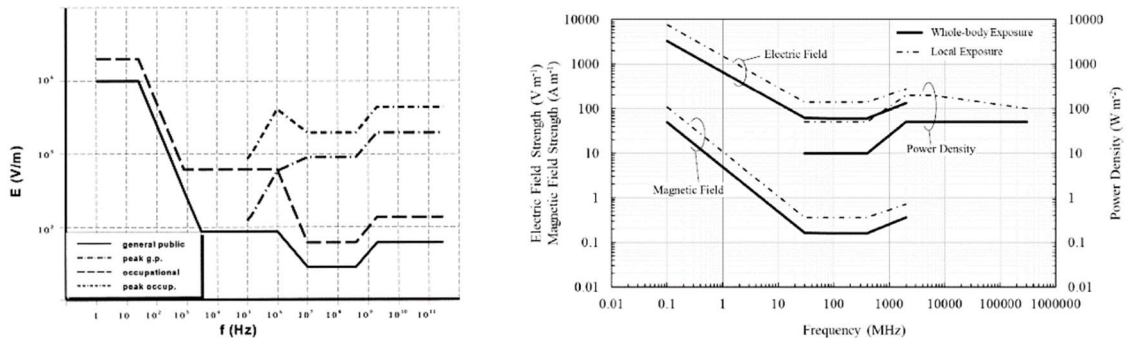
Elektromagnetische velden zijn overal om ons heen. Waar elektrische ladingen bewegen ontstaan elektromagnetische velden. Het lichtnet, de koelkast of de oplader van een telefoon hebben allemaal een eigen elektromagnetisch veld. Zo veroorzaken de accu's en andere elektrische systemen in elektrische bussen ook een elektromagnetisch veld. Binnen het volledige elektromagnetisch spectrum wordt onderscheid gemaakt tussen niet-ioniserende straling en ioniserende straling. Het verschil is dat gezondheidseffecten door blootstelling aan ioniserende straling vaak blijvend zijn. Bij niet-ioniserende straling verdwijnen de effecten zoals warmteontwikkeling als je verder en op tijd weggaat van de bron. Extreem-laagfrequente en radio frequente elektromagnetische velden liggen beide in het niet-ioniserende deel van het spectrum (Afbeelding 1).



Afbeelding 1. Elektromagnetisch spectrum

De elektromagnetische velden waaraan we ons blootstellen in het dagelijks leven kunnen behoorlijk uiteenlopen. Bij bepaalde beroepen kunnen blootstellingen ook een stuk hoger liggen dan het achtergrondniveau. Wat betreft extreem-laagfrequente velden zijn dat onder andere hoogspanningswerkers, elektrische lassers en treinmachinisten. Voor radio-frequente velden zijn dat bijvoorbeeld antennebouwers en fysiotherapeuten. De International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) heeft per frequentieband richtlijnen opgesteld voor de maximale blootstelling (Afbeelding 2). De opgestelde limieten van de ICNIRP zijn gebaseerd op het vermogen van elektromagnetische velden om het menselijk lichaam op te warmen. De grens wordt gesteld bij een verhoging van de lichaamstemperatuur met 1 graad voor de duur van 6 minuten. Limieten voor werknemers en burgers verschillen. Bij werkenden wordt uitgegaan van een

gezonde beroepsbevolking. In de algemene bevolking wordt ook rekening gehouden met kinderen, ouderen en kwetsbare mensen.



Afbeelding 2. Links: ICNIRP-richtlijn (ICNIRP, 1998), Rechts: ICNIRP-richtlijn (ICNIRP, 2020)

De Nederlandse overheid hanteert in het kader van het Voorzorgsprincipe ook een richtlijn voor het wonen in de nabijheid van hoogspanningslijnen. Deze ligt op 0,4 μ T (micro Tesla) als constante blootstelling. De richtlijn is opgesteld naar aanleiding van een rapport van het Internationale Agentschap voor Onderzoek naar Kanker (International Agency for Research on Cancer, IARC, 2002) en rapporten van de Nederlandse Gezondheidsraad (Gezondheidsraad, 2000, 2018). Uit deze publicaties blijkt dat er een verband is tussen blootstelling aan extreem laagfrequente elektromagnetische velden in de woonomgeving t.g.v. het wonen nabij een hoogspanningslijn en de incidentie van kinderleukemie. Vanwege deze richtlijn adviseert de Rijksoverheid om, afhankelijk van het soort hoogspanningslijn niet binnen 115 tot 215 meter afstand van een hoogspanningslijn te bouwen.

Om een antwoord te kunnen formuleren op de vraag van het busbedrijf is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd:

Wat is de blootstelling aan Extreem-laagfrequente (ELF) en Radiofrequente (RF) Elektromagnetische velden (EMV) van buschauffeurs in rijdende elektrische bussen en niet-elektrische bussen?

Materiaal en methode

ELF-EMV

De blootstelling aan ELF-EMV van de chauffeurs afkomstig van de elektromotor, accu's en bedrading van de elektrische en dieselbussen, is gemeten met de **EMDEX Lite**. De EMDEX Lite is gemaakt door Enertech Consultants (Campbell, Californië). Deze dosimeter meet de magnetische fluxdichtheid of het B-veld over drie assen van 40 Hz tot 1000 Hz. De gevoeligheid loopt van 0,05 μT tot 70 μT per as. De formule die hierbij wordt gebruikt is $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ waarbij B_x , B_y en B_z de waardes per as zijn. Welke worden gemiddeld per 4 seconden interval. Door de vierkantswortel te nemen krijg je de vector **B(t)** als maat voor de blootstelling aan het magnetisch veld.

RF-EMV

De blootstelling aan elektromagnetische velden van radio, WiFi-router en mobiele communicatiemiddelen is in kaart gebracht met de ExpoM-RF en de Radman 2XT. De **ExpoM-RF** is gemaakt door Fields at Work (Zürich, Zwitserland). Deze dosimeter meet radiofrequente elektromagnetische velden van 87.5 MHz tot 5.875 GHz en splitst deze uit over 16 verschillende banden. Elke 3 seconden wordt er een meetwaarde opgeslagen per frequentieband. Met een gevoeligheid van 0,005 V/m tot 5 V/m (of 0.066 W/m² tot 66312 W/m²).

De **Radman 2XT** is gemaakt door Narda Safety Test Solutions (Pfullingen, Duitsland). Deze dosimeter meet elektromagnetische velden van 900 kHz tot 60 GHz. Waarmee deze een groter meetbereik heeft dan de ExpoM-RF. Het meetinterval is 1 seconde maar de meetwaardes worden per minuut opgeslagen. Elk meetpunt heeft een minimum, maximum en gemiddelde meetwaarde over de minuut. De Radman 2XT drukt de totale waargenomen blootstelling uit als percentage van de ICNIRP 1998 norm. Alle dosimeters zijn gekalibreerd voor het onderzoek.

Dosimeter harnas

Het gebruikte dosimeter harnas is gemaakt door TEE-UU (Munchen, Duitsland). Dit harnas is speciaal ontworpen om radio's in te dragen voor de brandweer en andere hulpdiensten. Tijdens het onderzoek zijn de ExpoM-RF en Radman 2XT in dit harnas gedragen.



Afbeelding 3. V.l.n.r. EMDEX Lite, ExpoM-RF, Radman 2XT, TEE-UU harnas

Statistische en andere software

Gegevensverwerking

-R-Studio 4.0.3

R-studio is gebruikt om ruwe meetgegevens om te schrijven in een leesbare vorm voor het Piekenprogramma. De libraries "tidyr", "stringr" en "dplyr" zijn hiervoor gebruikt.

-Piekenprogramma

Piekenprogramma is ontwikkeld bij het IRAS. Het kan van ruwe data voortschrijdende gemiddelden maken voor zowel individuele 4 seconden en 1 minuut gemiddelden van de EMDEX Lite, als de 3

seconden en 1 minuut gemiddelden van de ExpoM-RF. Daarnaast produceert het Piekenprogramma de variabelen: tijd tussen pieken, aantal pieken, gemiddelde piek duur en maximale piekhoogte voor de EMDEX Lite met 0,4 μ T als drempelwaarde.

-Excel

De gebruikte database voor analyse is gebouwd in Excel.

-SAS 9.4

SAS 9.4 is gebruikt voor de statistische analyse en het genereren van figuren uit de meetwaarden.

Statistische analyse

Meetgegevens uit de EMDEX Lite zijn met R-studio 4.0.3 met een daarvoor ontwikkelde macro in een leesbare vorm ingevoerd in het Piekenprogramma (Preller *et al.*, 2004). Elke waarde groter of gelijk aan 0,4 μ T werd aangemerkt als piek.

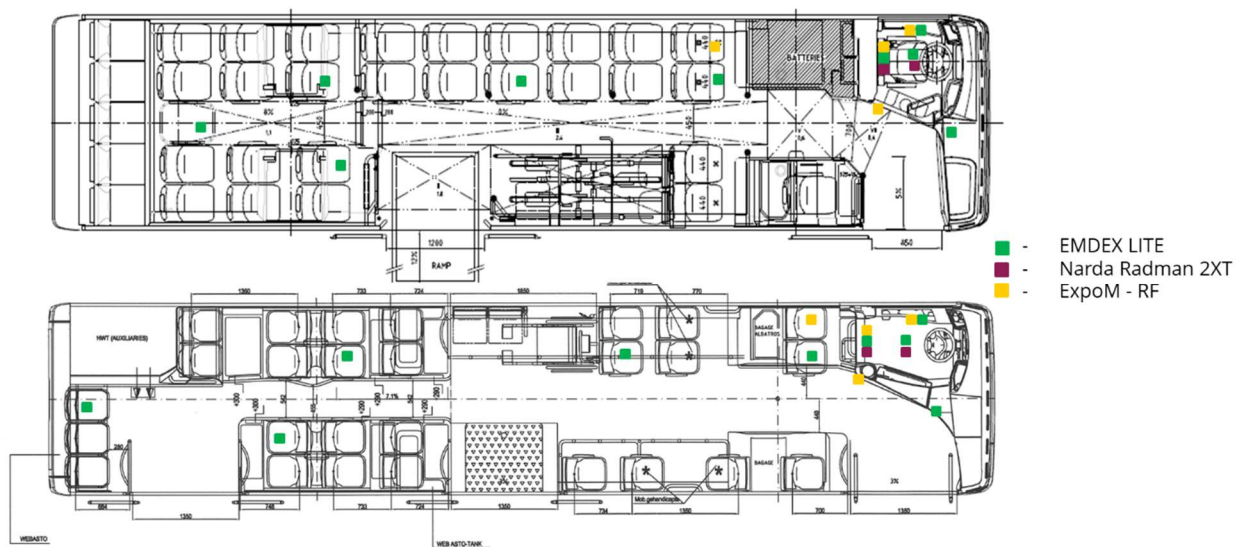
De ruwe meetwaarden, met elke 3 seconden een meting voor de ExpoM-RF, zijn per individuele meetdag van elke chauffeur ingevoerd in het Piekenprogramma. De meetwaarden werden omgezet in gemiddelde blootstelling en kenmerken van de pieken over de duur van de bemeten dienst.

Vervolgens zijn met zogenaamde mixed models regressietechnieken de daggemiddelde blootstellingen aan ELF-EMV en RF-EMV geanalyseerd om verschillen tussen bussen, tussen individuele chauffeurs en de bronnen van deze blootstelling nader te duiden.

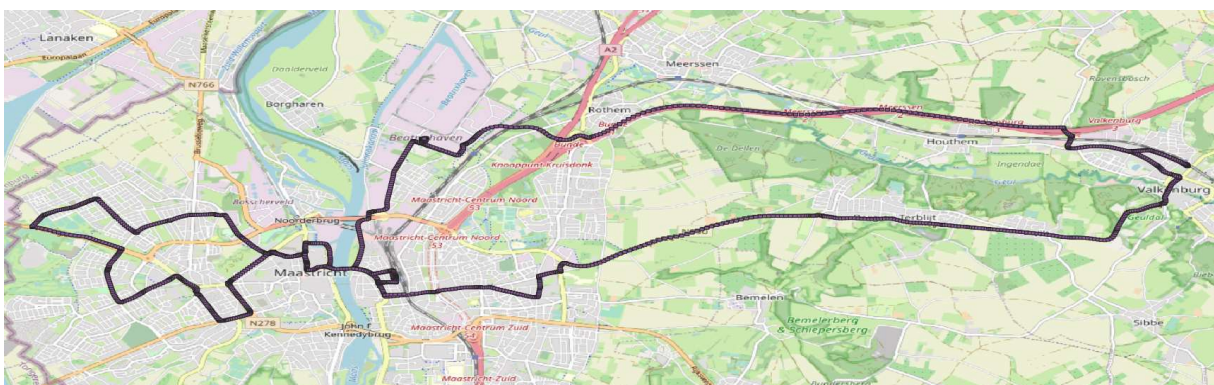
Pilotstudie

Voor het onderzoek plaatsvond is een pilotstudie over twee dagen uitgevoerd. Op basis van de pilotstudie is een meetstrategie ontwikkeld. Beide typen van de elektrische bus werden uitgerust met 15 dosimeters, 13 verspreid over de bus en twee op de chauffeur (afbeelding 3). Hiermee werd een schatting van de ruimtelijke verdeling van de blootstelling in de bus en de persoonlijke blootstelling van de chauffeur verkregen. Chauffeurs hadden de mogelijkheid om van tevoren vragen of zorgen met de betrekking tot de studie te uiten. Vanwege deze vragen, zijn bij de linkervoet van de chauffeurs extra meters geplaatst tijdens de pilotstudie.

Beide elektrische bussen hebben dezelfde route gereden, lijn 3* (Afbeelding 4) van Maastricht Centraal Station naar Valkenburg en terug. De gemeten data werd gekoppeld aan de locatie-data (Global Positioning System (GPS)) van de ExpoM-RF. Hiermee kon de gemeten ELF-EMV en RF-EMV waarden aan een specifieke locatie worden gerelateerd.



Afbeelding 4. Boven: Streekbus (97-serie). Onder: Stadsbus (96-serie).



Afbeelding 5. Lijn 3, GPS-data pilotstudie

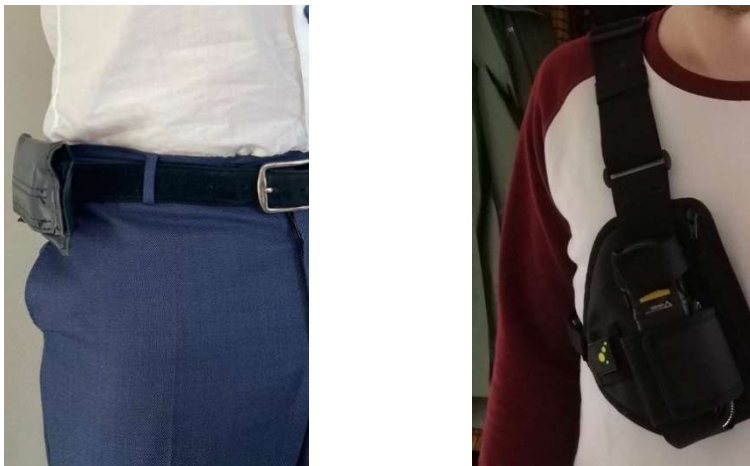
Tijdens de pilotstudie bleek de blootstelling aan ELF-EMV tussen de elektrische stads- en streekbus te verschillen. De persoonlijk gemeten gemiddelde blootstelling tijdens de pilotstudie bedroeg $0,16 \mu\text{T}$ in de streekbus en $0,09 \mu\text{T}$ in de stadsbus. Voor de blootstelling aan RF-EMV werd tijdens de pilotstudie duidelijk, dat meer dan 50% van de blootstelling afkomstig was van de 800 en 900 MHz frequentiebanden. Deze banden horen bij mobiel dataverkeer. De metingen n.a.v. de vooraf

gestelde vraag van chauffeurs over blootstelling aan de linkervoet lieten geen significant hogere niveaus zien.

Meetstrategie

Alle deelnemende chauffeurs werkten vanaf dezelfde locatie in het zuiden van Nederland. In totaal zijn 188 chauffeurs werkzaam op deze locatie. Alle chauffeurs die werkzaam waren ten tijde van de metingen konden vrijwillig deelnemen. 78 van hen hebben uiteindelijk deelgenomen aan het onderzoek.

EMDEX Lite dosimeters voor de ELF-EMV werden met behulp van een clip aan de riem gedragen. De ExpoM-RF en Radman 2XT werden in een harnasje op de borst gedragen (afbeelding 6). De metingen begonnen 5 minuten voor de vertrektijd van de bus vanaf de centrale. De metingen eindigden 5 minuten na aankomst van de bus bij de centrale. Van de chauffeurs werd het chauffeursnummer genoteerd. Informatie over leeftijd en aantal dienstjaren als chauffeur is ook verzameld.



Afbeelding 6. . Links: EMDEX Lite zoals gedragen tijdens het onderzoek op de broekriem. Rechts: Radman 2XT in borstharnas. ExpoM-RF metingen zijn ook op deze manier uitgevoerd.

Hoofdstudie

De persoonlijke blootstellingsmetingen zijn uitgevoerd over een periode van twee werkweken. In week 16 en week 23 in 2021. Buschauffeurs werden bij aanvang van hun werkdag uitgerust met een van de drie typen dosimeters. De dosimeters werden willekeurig toegewezen. Elke chauffeur reed volgens de normale dienstregeling. Na afloop van iedere werkdag werden de dosimeters ingenomen en uitgelezen. Chauffeurs hielden zelf de bus-wissels bij op papier. Daarnaast werd van alle werkdagen bijgehouden of het een vroege of late dienst betrof. Diensten die begonnen na 13:00 uur werden aangemerkt als late dienst.

Herhaalde metingen per chauffeur konden worden geïdentificeerd met behulp van het chauffeursnummer. De daadwerkelijke identiteit van de chauffeurs was alleen bij de werkgever bekend.

Vergelijking met blootstellingslimieten

Voor het onderzoek naar extreem-laagfrequente velden is als richtlijn 1000 μT aangehouden (ICNIRP, 2020). Voor de radiofrequente velden, zijn deze gegroepeerd op basis van toepassing van de frequenties. Elke groep is vergeleken met de laagste richtlijn in het betreffende frequentiegebied. De gehanteerde richtlijnen zijn te vinden in Tabel 1. Eenzelfde verdeling van de frequentiebanden is toegepast in (Schmutz et al., 2022).

Tabel 1. Blootstellingsrichtlijnen radio-frequente Velden (ICNIRP 2020)

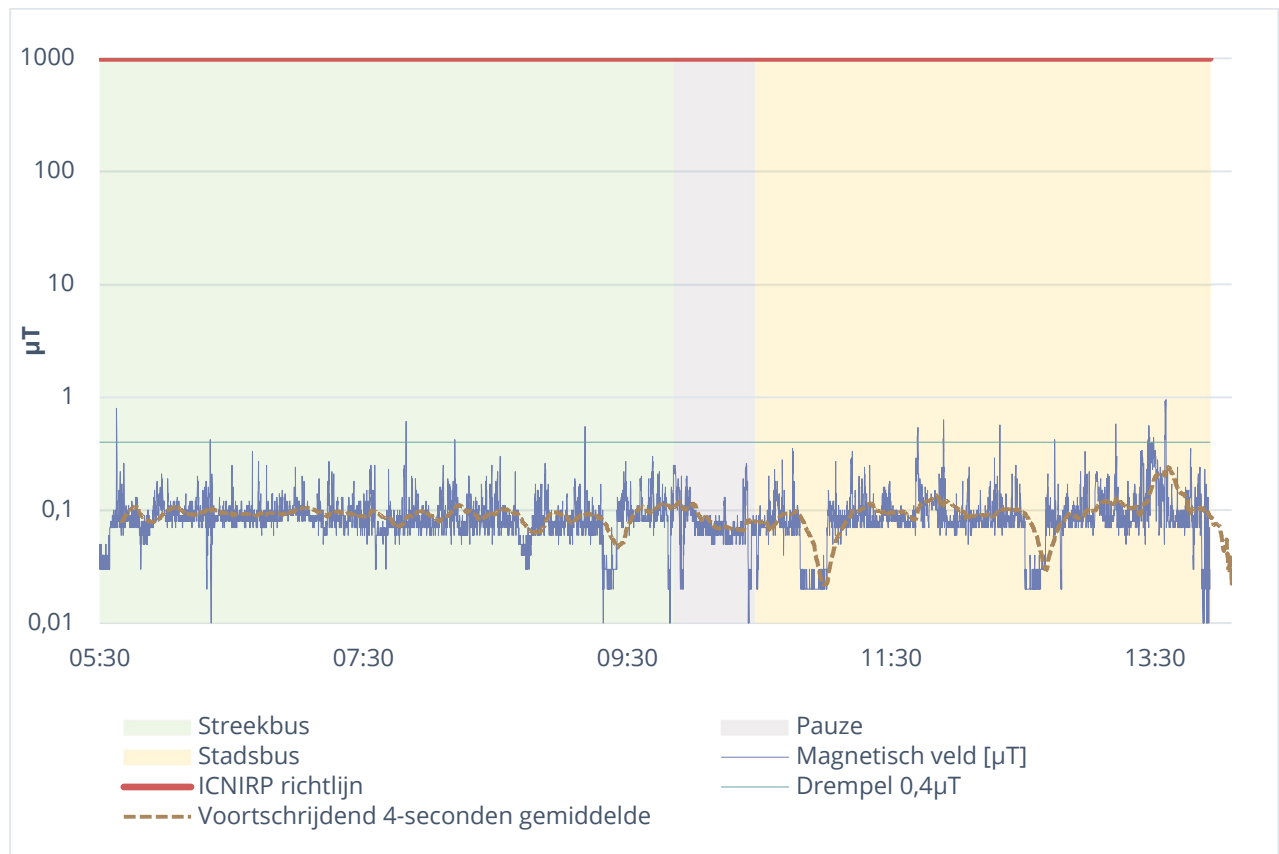
Groep	Frequentie	Werkenden	
		W/m ²	V/m
Broadcast	87.5-108MHz	10	61
Downlink	791-821 MHz (LTE)	16	84
	925-960 MHz (GSM)		91
	1805-1880 MHz (GSM)		127
	2110-2170 MHz (UMTS)		137
	2620-2690 MHz (LTE)		137
Uplink	832-862 MHz (LTE)	16	86
	880-915 MHz (GSM)		89
	1710-1785 MHz (GSM)		124
	1920-1980 MHz (UMTS)		131
	2500-2570 MHz (LTE)		137
DECT	1880-1900 MHz	45	130
Wi-Fi	2400-2485 MHz	50	137
WiMax	3400-3600 MHz	50	137
ISM	5150-5875 MHz	50	137

Opschonen meetgegevens

In totaal hebben 78 buschauffeurs vrijwillig deelgenomen en is hun blootstelling gedurende 149 werkdagen gemeten. Bij 29 van hen zijn RF-metingen uitgevoerd en bij 54 van hen zijn ELF-metingen uitgevoerd. Vijf metingen zijn uitgesloten van de statistische analyse omdat bij twee metingen de bus types niet zijn bijgehouden en bij twee andere metingen gaf de chauffeur aan expres ongunstig te hebben opgetrokken en geremd gedurende de dienst. Verder heeft één van de chauffeurs de ExpoM-RF onder zijn trui gedragen. Enkele chauffeurs hebben de dosimeter afgedaan tijdens de dienst. Deze werkdagen zijn helemaal niet meegenomen. Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in 144 bruikbare metingen voor de (statistische) analyse.

Uitgewerkt voorbeeld werkdagmetingen

In Figuur 1 en Tabel 2 is een voorbeeld van een ELF-werkdag meting te zien. De EMDEX Lite registreert elke 4 seconden een meetwaarde gemiddeld over de assen in μT . Ter vergelijking is de ICNIRP-norm van $1000 \mu\text{T}$ voor ELF aangehouden. De drempelwaarde van $0,4 \mu\text{T}$ is gehanteerd om een piekwaarde te definiëren. In Tabel 2 staan de verzamelde gegevens en een aantal waarden uit het Piekenprogramma van deze werkdag.



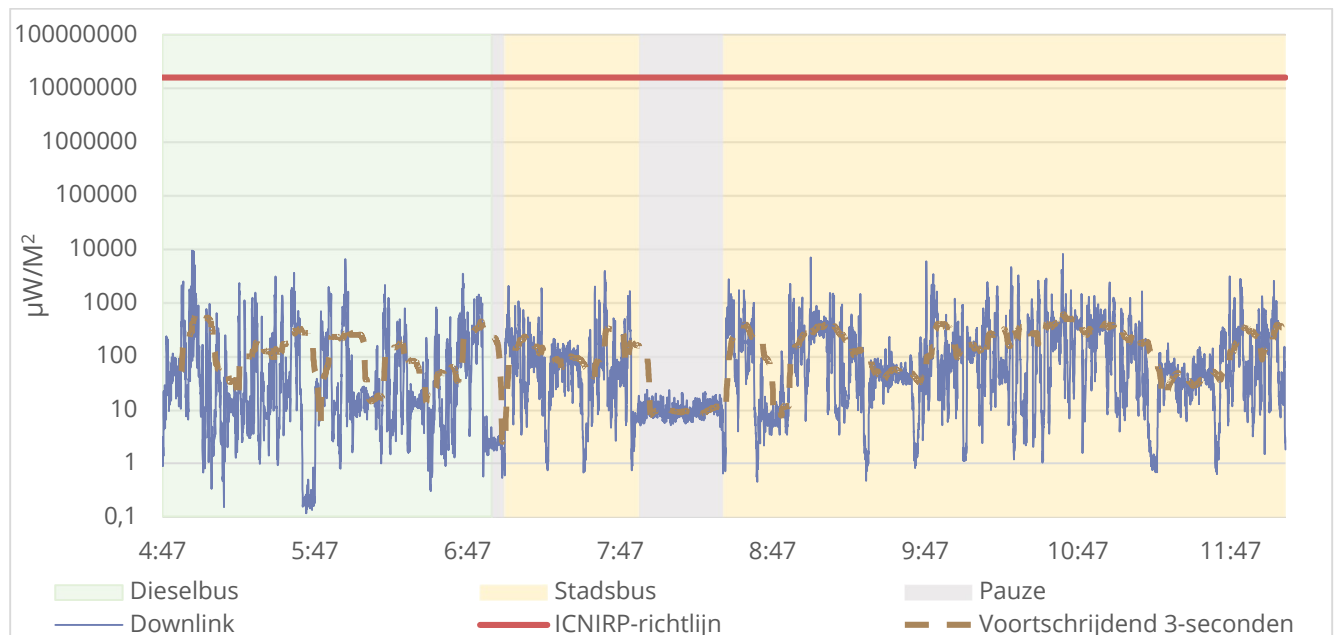
Figuur 1. Voorbeeld werkdag ELF-meting

Tabel 2. Voorbeeld werkdag ELF gegevens

Meetwaarden	
Aantal pieken	17
Piek gemiddelde	0,47 μT
Maximumwaarde	0,95 μT
Tijd >0,4	136 seconden
Rekenkundig gemiddelde (RG)	0,09 μT
Geometrisch gemiddelde (GG)	0,08 μT
Gegevens	
Leeftijd	64 jaar
Werkjaren	40 jaar

Tijd in bus		
Streekbus	257	min
Pauze	41	min
Stadsbus	206	min
	Begin	Eind
Streekbus	05:30	09:51
Pauze	09:52	10:27
Stadsbus	10:28	13:54

In Figuur 2 en Tabel 3 is een voorbeeld van een werkdag meting met de ExpoM-RF te zien. Figuur 2 laat de blootstelling aan de Downlink frequenties zien met een voortschrijdend gemiddelde inclusief de ICNIRP-richtlijn. De gegevens over de chauffeur, frequentieband gemiddelden en maximale waarden over de werkdag staan in (Tabel 3).



Figuur 2. Voorbeeld werkdag RF-meting.

Tabel 3. Voorbeeld werkdag RF-meting

Meetwaarden	$\mu\text{W}/\text{M}^2$	
	RG	Maximum
Frequentieband		
Downlink	84	9203
Uplink	3	27904
Broadcast	23	2893
DECT	2	848
WiFi	2	1752
WiMax	0	1
ISM	3	190
Totaal	159	28228

Gegevens		
Leeftijd	25	jaar
Werkjaren	6	jaar
Tijd in bus		
Dieselbus	124	min
Stadsbus	268	min
Pauze	40	min

Resultaten

Er zijn drie verschillende bustypen meegenomen in de studie. Een elektrische bus voor lange afstanden (streekbus), korte afstanden (stadsbus) en dieselbussen. Er zijn geen bemeten werkdagen geweest waarop een chauffeur alleen in een dieselbus heeft gereden. Voor de bepaling van de werkdaggemiddelden per bus type is gebruik gemaakt van vier hoofdcategorieën:

1. Alleen in elektrische streekbus gereden
2. Alleen in elektrische stadsbus gereden
3. In beide typen elektrische bussen gereden
4. In diesel en elektrische bussen gereden

Participanten

78 buschauffeurs hebben vrijwillig deelgenomen. De gemiddelde leeftijd van de deelnemende chauffeurs was 55 jaar (spreiding 20 tot 68 jaar). Aantal dienstjaren liepen van de eerste werkdag tot 43 jaar, met een gemiddeld aantal dienstjaren van 16,8 jaar. De gemiddelde duur van een werkdag was 7,3 uur inclusief pauzes. Van de 144 bemeten werkdagen waren 17 late en 127 vroege diensten.

Extreem-laagfrequente elektromagnetische velden

Van de 144 bemeten werkdagen zijn er 105 uitgevoerd met de EMDEX Lite. Deze 105 werkdagen zijn gecategoriseerd op basis van bovengenoemde bus typen. Er zijn geen metingen verricht waarbij de chauffeur de gehele werkdag op een dieselbus heeft gereden. De categorie "Dieselbus" bestaat enkel uit de delen van de werkdagen van categorie 4 (Diesel en elektrische bussen), waar in de dieselbus werd gereden. Van alle werkdagen is zowel het rekenkundige gemiddelde (RG) als het geometrisch gemiddelde (GG) bepaald. Het rekenkundig gemiddelde is zichtbaar in tabel 4. Evenals het aantal pieken per werkdag, de duur van deze pieken en de werkdag. De duur van de pieken is als percentage afgezet tegen de totale duur van de werkdag.

Het totaal gemiddelde van alle werkdagen komt op 0,11 μT (zie Tabel 4). Verschillen tussen type bus zijn gering. In elektrische streekbussen is de blootstelling significant 35% hoger in vergelijking met de stadsbussen. De tijd per werkdag $\geq 0,4 \mu\text{T}$ is ruim 4 keer langer in streekbussen dan in stadsbussen. Tot 15 keer wanneer dit vergeleken wordt met een "Dieselbus". Dit komt echter maximaal maar neer op 3% van de totale werkdag. Variantieanalyse liet geen verschillen in gemiddelde blootstelling aan extreem-laagfrequente velden van de individuele buschauffeurs zien. De blootstelling varieerde enkel van dag tot dag. De roulatie van de chauffeurs over de verschillende typen bussen lijkt een aannemelijke verklaring voor het feit dat er geen verschillen zijn in gemiddelde blootstelling aan ELF-EMV tussen de chauffeurs.

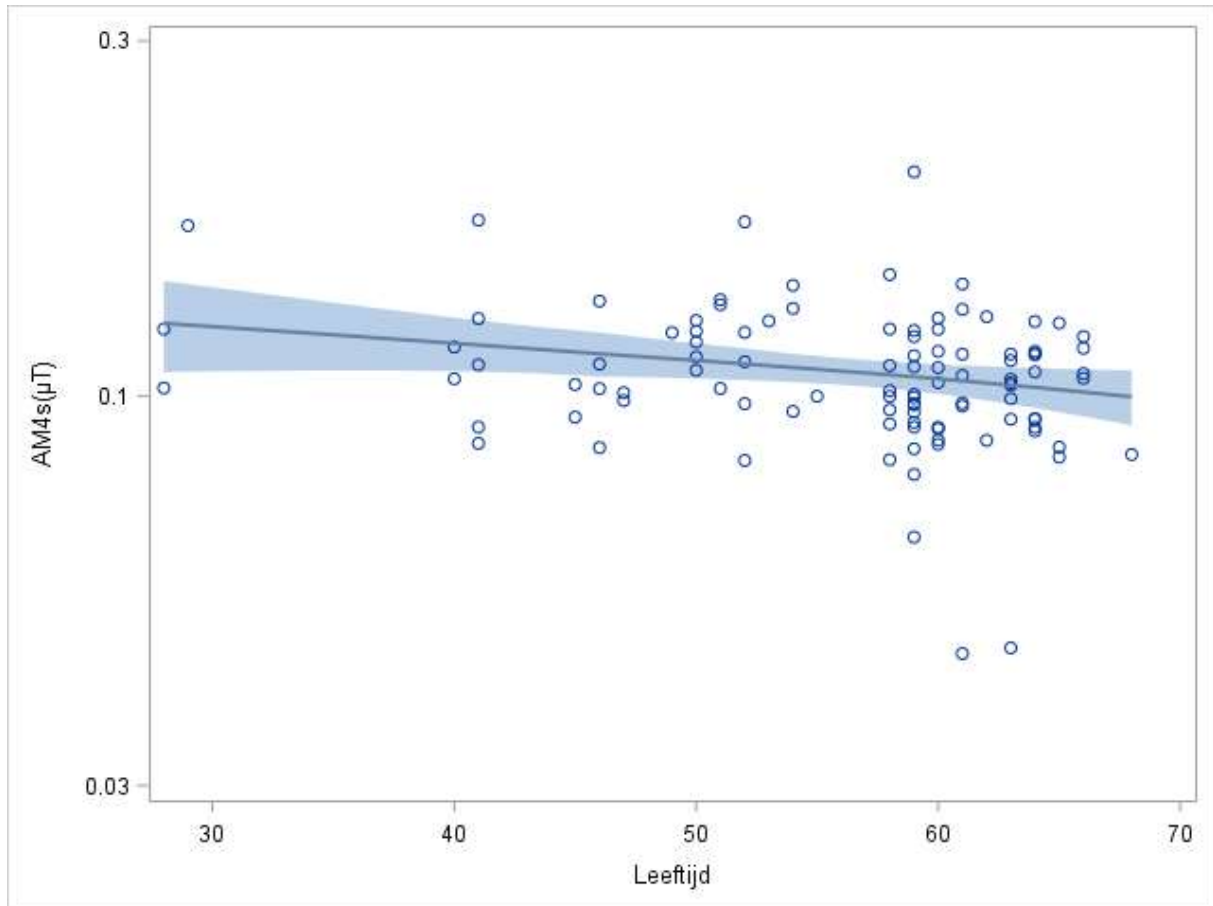
Tabel 4. Blootstelling extreem laag frequente elektromagnetische velden

	N	RG [μT]	GSD RG [μT]	% dienst $\geq 0,4\mu\text{T}$	Aantal Pieken $\geq 0,4\mu\text{T}$	Max [μT]	Tijd $\geq 0,4\mu\text{T}$ [min]	Werkdag [uur:min]
Allen	105	0,11	1,24*	1,4	18,0	16,9	05:59	07:42
Stadsbus	32	0,10	1,27	0,7	15,1	16,9	02:48	07:27
Streekbus	13	0,13	1,20	3,0	26,4	1,2	12:10	07:22
Stadsbus + Streekbus	41	0,11	1,14	1,7	20,7	1,4	07:25	08:02
Diesel + mix	19	0,10	1,27	1,0	12,2	5,8	04:03	07:41
Diesel bus	19	0,10	1,57	0,2	2,4	2,2	00:21	03:01

*Tussenpersoons-variantie bedroeg 0% en dag-tot-dag variantie 100%.

Leeftijd

Een van de factoren die een significant effect had op de blootstelling aan ELF-EMV was de leeftijd van de buschauffeur. Des te ouder de chauffeur des te lager de blootstelling. Het verlagende effect bedraagt 5% per 10 jaar oudere leeftijd (Figuur 3). Het aantal dienstjaren van de chauffeur (0-43 jaar) maakte geen verschil. Het hebben van een late of vroege dienst had ook geen impact op de totale blootstelling.



Figuur 3. Verband tussen leeftijd van de buschauffeur en blootstelling aan ELF-EMV

Radiofrequente elektromagnetische velden

In totaal zijn gedurende 39 diensten de blootstellingen aan RF-EMV gemeten. 35 metingen zijn uitgevoerd met de ExpoM-RF en 4 metingen met de Radman 2XT. De resultaten van de ExpoM-RF metingen zijn in dezelfde vier hoofdcategorieën ingedeeld als de ELF-EMV metingen.

De totale gemiddelde werkdagblootstelling (alle banden gecombineerd) bedroeg $141 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Vergeleken tegen de ICNIRP-richtlijn is dit 0,72% (Tabel 5). De gemeten maximale gemiddelde blootstelling met de Radman-2XT bedroeg 0,04% van de norm (Tabel 6). De blootstelling in stadsbussen was gemiddeld hoger dan in streekbussen. Beide blijven echter ruim binnen de geldende richtlijn per band. In Tabel 5 zijn de rekenkundige en geometrische gemiddelde evenals de percentages per bus en type frequentiegebied gepresenteerd. Veruit het grootste deel van de blootstelling (82%) komt van mobiel telefoon- en dataverkeer, de "Downlink" en "Uplink" frequenties. De hoogst gemeten piek blootstelling is $170433 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ($0,17\text{W}/\text{m}^2$) deze viel in de "Downlink frequenties) en bleef nog ruimschoots binnen de richtlijn van $16\text{W}/\text{m}^2$.

Er is een toename gevonden van blootstelling aan radio-frequente elektromagnetische velden met langere rijtijden op de elektrische bus. Dat wil zeggen dat de blootstelling toeneemt naarmate men langer achtereen op de elektrische bus rijdt. Dit geldt voor de Downlink, Uplink en Broadcast categorie. Voor de Wi-Fi is dit verband niet gevonden.

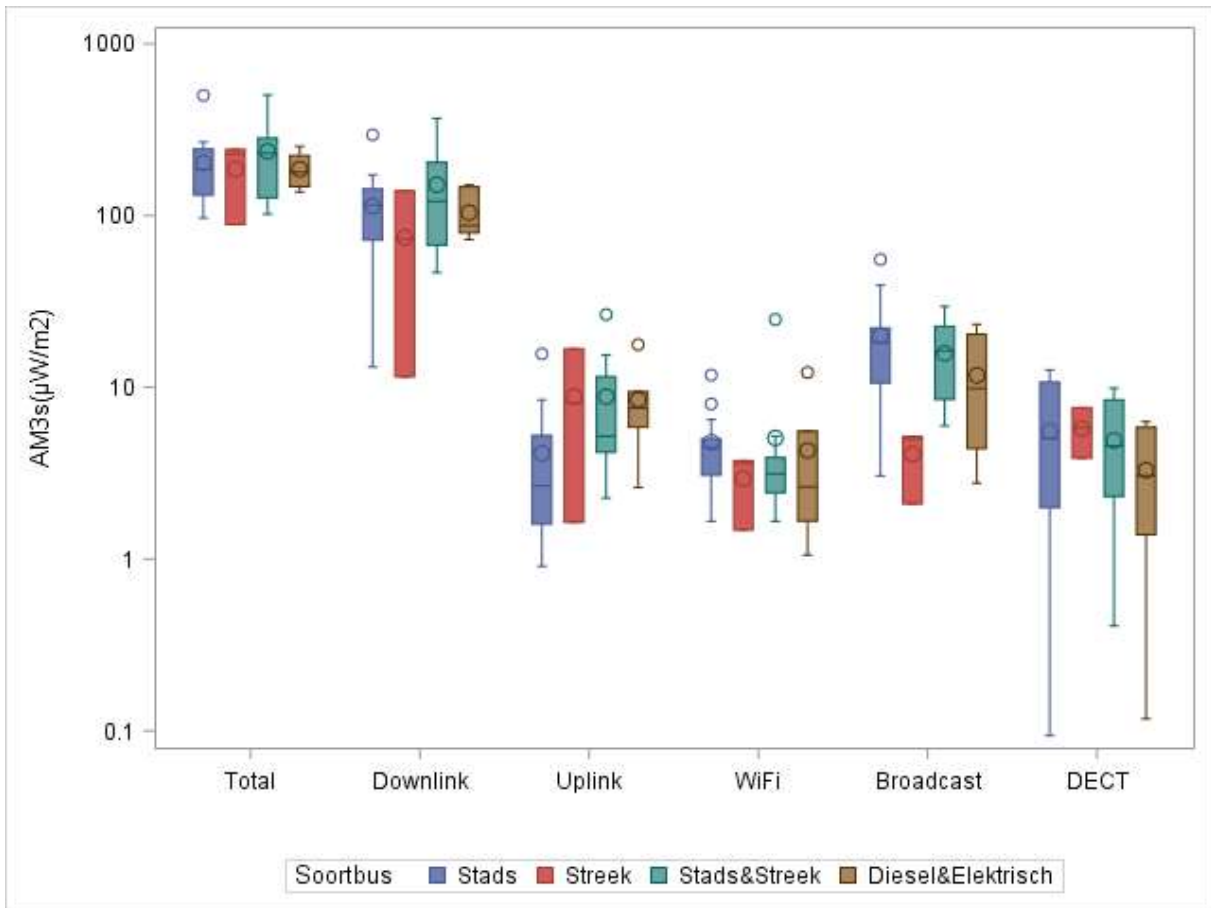
De individuele blootstellingen per chauffeur zijn per bustype in de frequentie categorieën uiteengezet in Figuur 4. Gemiddeld kwam 82% van de blootstelling van mobiel dataverkeer (de "Downlink" en "Uplink" frequenties), 10% was afkomstig van de radiocommunicatie tussen de bus en de centrale. De laatste 8% was afkomstig van de Wi-Fi en overige bronnen ("DECT", "WiMax" en "ISM") (Figuur 5).

Tabel 5. Resultaten RF-metingen ($\mu\text{W}/\text{m}^2$) per frequentie-band (ExpoM-RF) en als percentage van de ICNIRP-richtlijn.

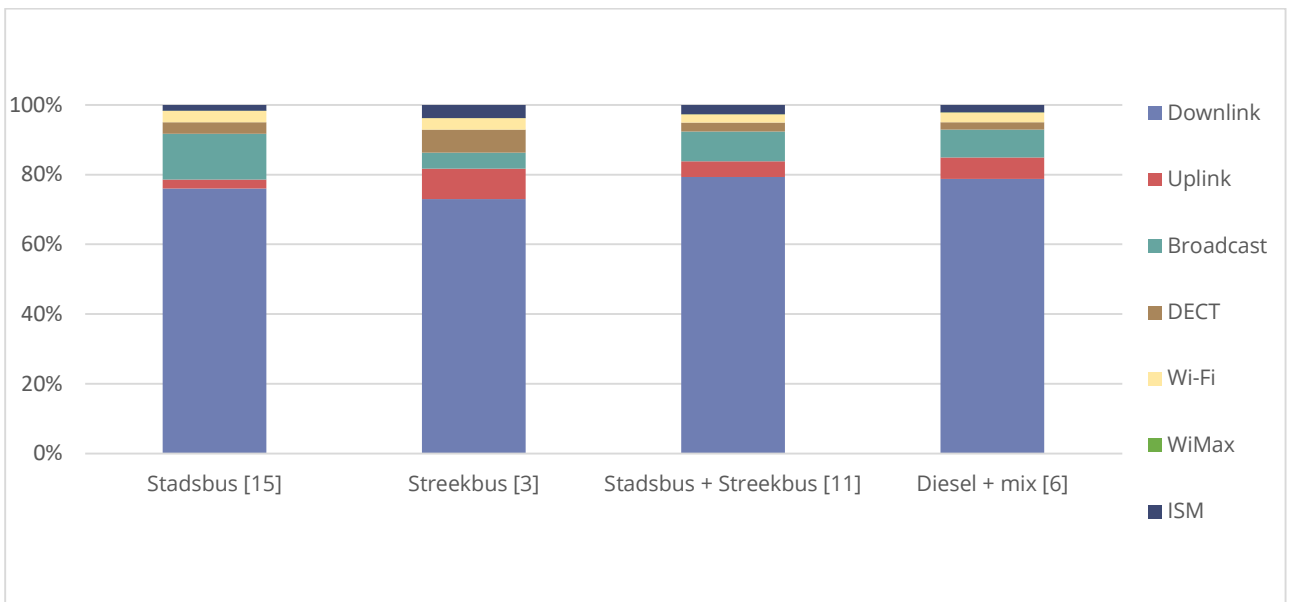
	N	Waarde	Downlink $\mu\text{W}/\text{m}^2$	Uplink $\mu\text{W}/\text{m}^2$	Broadcast $\mu\text{W}/\text{m}^2$	DECT $\mu\text{W}/\text{m}^2$	Wi-Fi $\mu\text{W}/\text{m}^2$	WiMax $\mu\text{W}/\text{m}^2$	ISM $\mu\text{W}/\text{m}^2$
Totaal	35	RG	109,78	5,74	14,11	4,18	4,09	0,01	3,15
		GG	51,25	2,06	6,27	1,27	2,66	0,01	4,14
		Range	0 - 170433	0 - 140411	0 - 47276	0 - 17503	0 - 17902	0 - 507	0 - 90118
		% ICNIRP-richtlijn	0,41	0,07	0,14	0,03	0,03	0,01	0,03
Stadsbus	15	RG	104,42	3,5	18,08	4,44	4,53	0,01	2,33
		GG	50,29	1,46	7,09	1,49	3,02	0,01	3,75
Streekbus	3	RG	62,63	7,51	3,94	5,66	2,83	0,01	3,26
		GG	39,77	4,6	3,77	1,39	1,72	0,01	4,21
Stadsbus + Streekbus	11	RG	137,87	7,8	14,85	4,35	4,14	0,01	4,7
		GG	62,68	2,74	6,87	1,35	2,77	0,01	4,89
Diesel + mix	6	RG	101,79	7,86	10,37	2,73	3,62	0,01	2,77
		GG	40,48	1,56	4,71	0,66	2,15	0,01	3,78

Tabel 6. Resultaten RF-metingen (Radman 2XT) als percentage van de ICNIRP-richtlijn.

Radman 2XT	N	Gemiddeld	Min	Max
Elektrische bus	4	0,025	0,00212	0,0439



Figuur 4. Variatie in daggemiddelde vermogensdichtheid per type frequentieband.



Figuur 5. Relatieve bijdrage van verschillen frequentiebanden aan totale RF-EMV blootstelling per type bus

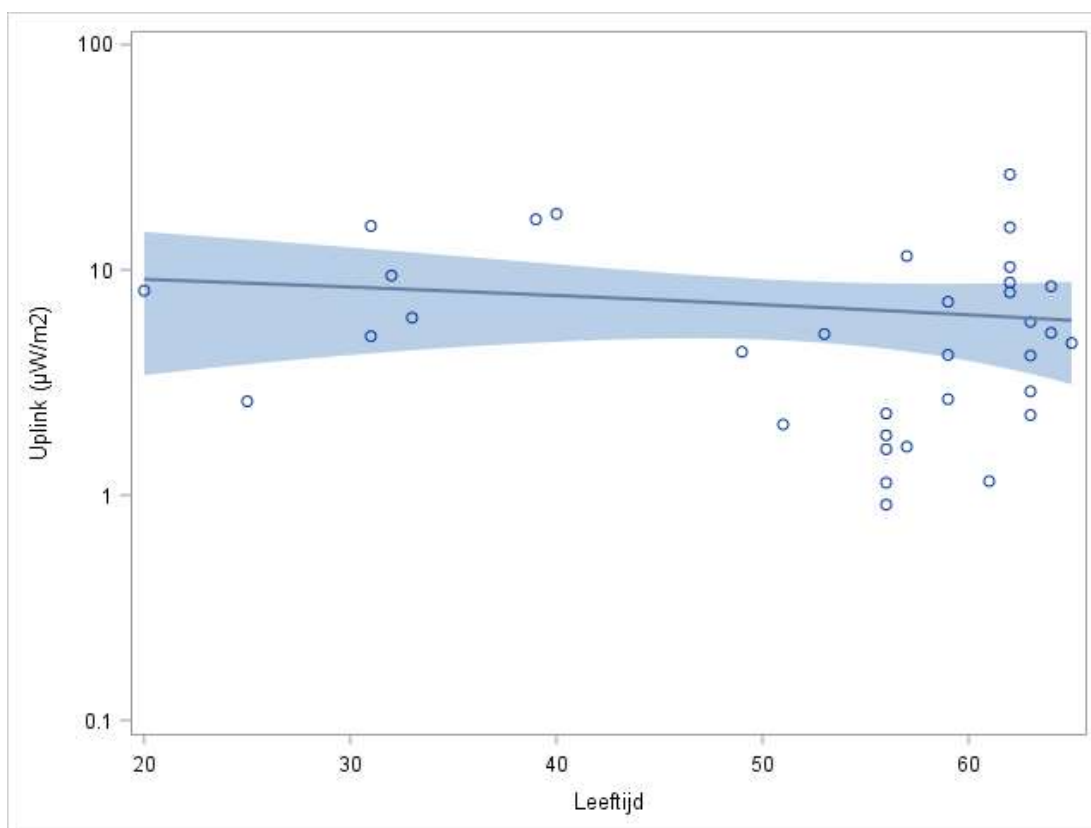
Variantieanalyses lieten in tegenstelling tot de daggemiddelde blootstelling aan extreem-laagfrequente velden, wel verschillen in gemiddelde blootstelling aan radiofrequente velden tussen individuele chauffeurs zien (zie tabel 7). Persoonlijke verschillen in gemiddelde blootstelling waren echter alleen voor “Downlink” en “Uplink” frequenties statistisch significant. Deze verschillen in gemiddelde blootstelling hebben hoogstwaarschijnlijk met persoonlijk telefoongebruik te maken.

Tabel 7. Resultaten variantieanalyses per radio-frequente band.

	Totaal	Downlink	Uplink	Broadcast	DECT	WiFi	WiMax	ISM
Geometrische standaard deviatie	1.53	2.09	2.29	2.15	3.86	1.87	1.48	3.51
Tussenpersoons variatie	29%	71%	61%	0%	0%	0%	27%	0%
Dag-tot-dag variatie	71%	29%	39%	100%	100%	100%	73%	100%

Leeftijd

Voor de radiofrequente velden is alleen een zwak negatief verband tussen leeftijd en blootstelling voor de “Uplink” frequenties gevonden (Figuur 6). Des te ouder de chauffeur des te lager de blootstelling aan “Uplink” radio-frequente velden. Dit verband is niet statistisch significant vanwege het geringe aantal metingen. Voor de andere radiofrequente frequenties is dit verband er niet.



Figuur 6. Verband leeftijd buschauffeur en blootstelling aan “Uplink” radio-frequente velden

Discussie en conclusie

De daggemiddelde blootstellingen van de buschauffeurs bedragen $0,11\mu\text{T}$ voor de extreem-laagfrequente elektromagnetische velden ($<0,001\%$ van ICNIRP-richtlijn) en $141\mu\text{W}/\text{m}^2$ voor de

radiofrequente elektromagnetische velden (0,72% van ICNIRP-richtlijn). Beide gemiddelden vallen ruim binnen de ICNIRP-richtlijnen. Dit geldt ook voor kortdurende piekblootstellingen. Bij deze blootstellingen zijn geen schadelijke gezondheidseffecten te verwachten, ten gevolge van opwarming van weefsels. Het is niet uit te sluiten dat andere biologische mechanismen een rol spelen, die zouden kunnen leiden tot klachten en/of aandoeningen. Daar is echter geen overtuigend bewijs voor.

Voor de blootstelling aan extreem-laagfrequente elektromagnetische velden is een verschil gevonden tussen de elektrische streekbussen t.o.v. de elektrische stads- en dieselbussen. Een chauffeur op een elektrische streekbus heeft gemiddeld een 35% hogere blootstelling. De meest aannemelijke verklaring hiervoor is het zwaardere accupakket dat in een streekbus ligt. Dit wordt onderschreven door de stationaire metingen in de pilotstudie. Tussen de individueel gemiddelde blootstellingen aan extreem laagfrequente velden van de chauffeurs zijn geen verschillen gevonden. Roulatie over de bustypen lijkt een logische verklaring.

Voor de blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden is geen verschil tussen de bustypen aangetoond. Langere rijtijden op de elektrische bus gaan wel gepaard met een cumulatieve hogere blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden voor mobiel dataverkeer, communicatie en radio (Broadcast, Downlink, Uplink, DECT). Dit geldt niet voor blootstelling aan Wi-Fi frequenties. Ook zijn verschillen gevonden tussen de individueel gemiddelde blootstellingen van chauffeurs aan radiofrequente elektromagnetische velden. Waarschijnlijk moet de verklaring worden gezocht in persoonlijk gebruik van mobiele telefoons. Als een chauffeur zijn/haar blootstelling aan radiofrequente velden verder zou willen beperken is het advies de mobiele telefoon zoveel mogelijk buiten de bus te gebruiken.

De daggemiddelde blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden gemeten met de ExpoM-RF bedroeg 0,72% van de ICNIRP-richtlijn. Het gering aantal metingen met de Radman 2XT resulteerde in een nog lager percentage van de ICNIRP-richtlijn (0,025%). De meest aannemelijke verklaring voor dit verschil in uitkomsten moet gezocht worden in de berekening van de percentages van de ICNIRP-richtlijn. Op basis van documentatie van Narda Safety Solutions kan worden afgeleid dat de percentages voor vijf frequentie-gebieden (<3 MHz, 3-30 MHz, 30-300 MHz, 300 MHz- 3 GHz en >3 GHz) worden berekend alvorens te worden gesommeerd. Met de resultaten van de ExpoM-RF zijn aanzienlijk meer percentages van de ICNIRP-richtlijn (16 frequentiegebieden), hetgeen resulteert in hogere waarden na sommatie van de percentages.

Sterke punten

Alle uitgevoerde metingen waren persoonlijke blootstellingsmetingen over volledige werkdagen. De metingen kunnen dan ook als representatief worden gezien. Daarnaast is deze studie voor zover bekend de meest omvangrijke studie ter wereld uitgevoerd onder buschauffeurs naar blootstelling aan extreem-laagfrequente en radiofrequente elektromagnetische velden.

Zwakke punten

Er is een ongelijke verdeling van de metingen over de bus-typen en dosimeters. Er zijn relatief weinig RF-metingen (ExpoM-RF) en dat geldt nog sterker voor de metingen met de Radman 2XT. Deelnemende chauffeurs stonden veel positiever tegenover het dragen van een EMDEX Lite ten opzichte van een ExpoM-RF of Radman 2XT gedurende de werkdag. De EMDEX Lite op de broekriem valt niet op. Vragen van passagiers over harnas met daarin een RF-dosimeter werden

als zeer vervelend ervaren. Enkele chauffeurs hebben hierop de meter afgedaan, waardoor deze gegevens niet meegenomen konden worden.

De drie typen dosimeters beslaan niet het complete elektromagnetische spectrum. Het zwaartepunt van de studie lag rond de lagere frequenties van de accu, bedrading en elektromotor. De frequenties tussen de 1000 Hz bovengrens van de EMDEX Lite en de 900 kHz ondergrens van de Radman 2XT zijn niet bemeten. De verwachting is dat de bijdrage aan ELF-EMV en RF-EMV van bronnen in deze frequenties gering zal zijn.

Vergelijking literatuur

De resultaten van het onderzoek zijn vergeleken met andere studies naar de blootstelling aan ELF-EMV van buschauffeurs. Op het RF-EMV gebied zijn de resultaten afgezet tegen een studie met Zwitserse tieners (Roser *et al.*, 2017) en een studie met Engelse tieners (Schmutz *et al.*, 2022) (Tabel 8). Beide studies werden uitgevoerd met de ExpoM-RF.

Tabel 8. RF-EMV blootstelling van NL-buschauffeurs met andere populaties.

Frequentie gebied	Arriva chauffeurs 2021 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	Zwitserse tieners 2017 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	Engelse tieners 2019 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	Limiet (W/m^2)
Broadcast	14,1	4,3	111,7*	2
Downlink	109,8	12,5	81,3	3,5
Uplink	5,7	42,5	30,2	4
DECT	4,2	0,8	1,2	9
Wi-Fi	4,1	2,2	17,8	10
WiMax	0,01	-	-	10
ISM	3,2	-	-	10

De blootstellingswaarden van de Zwitserse en Engelse studie liggen in dezelfde orde van grootte als de blootstellingswaarden van de Nederlandse buschauffeurs. Bij de Engelse studie trekt één uitbijter de blootstellingswaarde bij broadcast omhoog naar $111,7\mu\text{W}/\text{m}^2$.

De Radman 2XT resultaten zijn vergeleken met een Spaanse studie (Tabel 9). De gevonden waarden liggen ook hier in dezelfde orde van grootte. Alle resultaten vallen ruimschoots binnen de geldende ICNIRP-richtlijnen. De piekblootstellingen halen een maximum van 0,24% bij fysiotherapeuten, voor buschauffeurs ligt dit maximum op 0,04%.

Tabel 9. RF-EMF blootstelling NL-buschauffeurs vergeleken met beroepsgroepen in andere studies.

Beroep	N	RG (% ICNIRP)	Min (% ICNIRP)	Max (% ICNIRP)
NL-buschauffeurs	4	0,025	0,00212	0,044
Spaanse buschauffeurs	10	0,029	0,00030	0,110
Fysiotherapeuten	32	0,061	0,00100	0,240
Bouwwerkers	37	0,012	0,00002	0,050

In conclusie

De daggemiddelde blootstelling aan extreem-laagfrequente elektromagnetische velden van de onderzochte buschauffeurs bedraagt 0,1 μT . Gemiddeld bijna 6 minuten, wat overeenkomt met 1,4% van een werkdag, is de ELF-EMV blootstelling boven 0,4 μT . De blootstelling in een elektrische streekbus is 35% hoger, maar door roulatie van de buschauffeurs over bussen en routes is hun gemiddelde blootstelling gelijk. Wel lijken oudere chauffeurs een iets lagere blootstelling te hebben.

De daggemiddelde blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden komt uit op 141 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. De grootste bijdrage (82%) aan de blootstelling komt van mobiel dataverkeer ("Downlink" en "Uplink" frequenties), 10% van radiocommunicatie tussen bus en centrale en 8% van Wi-Fi en overige bronnen. De RF-EMV blootstelling varieert niet tussen de bustypen, maar er zijn wel verschillen in daggemiddelde blootstelling tussen de buschauffeurs. Waarschijnlijk is persoonlijk mobiel belgedrag hier debet aan. Dit wordt bevestigd door individuele verschillen in gemiddelde blootstelling voor de "Uplink" en "Downlink" frequentiegebieden.

De gemeten blootstellingsniveaus voldoen aan de ICNIRP-richtlijnen. Schadelijke gezondheidseffecten als gevolg van opwarming door elektromagnetische velden zijn niet te verwachten tijdens het werken als buschauffeur in Maastricht.

Bijlage

Frequency band	Group ^a	Frequency range (MHz)	Quantitation limits strength (V/m)	field	Quantitation limits power flux density ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)
FM Radio	Broadcast	87.5-108	0.02 – 5		0.0011 - 66
DVB-T (TV4/5)	Broadcast	470-790	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 800 MHz downlink (LTE)	Downlink	791-821	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 800 MHz uplink (LTE)	Uplink	832-862	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 900 MHz uplink (GSM)	Uplink	880-915	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 900 MHz downlink (GSM)	Downlink	925-960	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 1800 MHz uplink (GSM)	Uplink	1710-1785	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 1800 MHz downlink (GSM)	Downlink	1805-1880	0.005 – 5		0.000066 - 66
DECT (cordless phones)	DECT	1880-1900	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 2.1 GHz uplink (UMTS)	Uplink	1920-1980	0.003 – 5		0.000024 - 66
Mobile 2.1 GHz downlink (UMTS)	Downlink	2110-2170	0.003 – 5		0.000024 - 66
ISM 2.4 GHz (WLAN)	Wi-Fi	2400-2485	0.005 – 5		0.000066 - 66
Mobile 2.6 GHz uplink (LTE)	Uplink	2500-2570	0.003 – 5		0.000024 - 66
Mobile 2.6 GHz downlink (LTE)	Downlink	2620-2690	0.003 – 5		0.000024 - 66
Mobile 3.5 GHz (WiMax)	WiMax	3400-3600	0.003 – 3		0.000024 - 24
ISM 5.8 GHz / U-NII 1-2e	ISM	5150-5875	0.05 – 5		0.0066 - 66

^a Downlink means the transmission from mobile phone base stations to mobile phone handsets *Bron:* <http://www.fieldsatwork.ch>.

Tabel 10. Gegevens Figuur 5 in percentages.

Type bus	Downlink	Uplink	Broadcast	DECT	Wi-Fi	WiMax	ISM
Stadsbus	76,05%	2,55%	13,17%	3,23%	3,30%	0,01%	1,70%
Streekbus	72,96%	8,74%	4,60%	6,60%	3,30%	0,01%	3,79%
Stadsbus + Streekbus	79,36%	4,49%	8,55%	2,50%	2,38%	0,01%	2,71%
Diesel + mix	78,82%	6,09%	8,03%	2,12%	2,80%	0,01%	2,14%

Referenties

- Bowman, J. D., Touchstone, J. A., & Yost, M. G. (2007). A Population-Based Job Exposure Matrix for Power-Frequency Magnetic Fields. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(9), 715–728. <https://doi.org/10.1080/15459620701528001>
- Gilbert, D., Leo, D., & Caroline, M. G. E. P. (2006). Blootstelling van de algemene bevolking aan 0 Hz tot 3 GHz elektromagnetische velden in bibliotheken elektrozaak grootwarenhuizen luchthavens openbaar vervoer stations wandel- en winkelstraten. Studie uitgevoerd door VITO in opdracht van de Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur, Energie 2006/IMS/R/210 VITO
- Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). (2020). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>
- International Agency for Research on Cancer, IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, World Health Organization, & International Agency for Research on Cancer. (2002). *Non-Ionizing Radiation*. Amsterdam University Press.
- Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport. (2018, 18 april). *Hoogspanningslijnen en gezondheid deel I: kanker bij kinderen*. Advies | Gezondheidsraad. Geraadpleegd op 25 januari 2022, van <https://www.gezondheidsraad.nl/documenten/adviezen/2018/04/18/hoogspanningslijnen-en-gezondheid-deel-i-kanker-bij-kinderen>
- Preller, L., Burstyn, I., De Pater, N., & Kromhout, H. (2004). Characteristics of Peaks of Inhalation Exposure to Organic Solvents. *The Annals of Occupational Hygiene*. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meh045>
- Roser, K., Schoeni, A., Struchen, B., Zahner, M., Eeftens, M., Fröhlich, J., & Rösli, M. (2017). Personal radiofrequency electromagnetic field exposure measurements in

Swiss adolescents. *Environment International*, 99, 303–314.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.008>

Van der Woord, M. P., Kromhout, H., Barregård, L., & Jonsson, P. (1999). Within-Day Variability of Magnetic Fields Among Electric Utility Workers: Consequences for Measurement Strategies. *AIHAJ*, 60(6), 713–719.

Schmutz C, Bürgler A, Ashta N et al. Personal radiofrequency electromagnetic field exposure of adolescents in the Greater London area in the SCAMP cohort and the association with restrictions on permitted use of mobile communication technologies at school and at home. *Environ Res.* 2022;212:113252. doi:10.1016/j.envres.2022.113252

